

OPERATIONAL DEFECTS AND THEIR IMPACT ON CHANGE STRUCTURES AND DESTRUCTION OF STRUCTURAL STEELS

Fomikhina I.

Doctor of Technical Sciences, Head of the Laboratory of Metal Physics of the Institute of Powder Metallurgy named after Academician O.V. Roman National Academy of Sciences of Belarus
Minsk

ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ДЕФЕКТЫ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ И РАЗРУШЕНИЕ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ

Фомихина И.В.

Доктор технических наук, заведующая лабораторией металлофизики Института порошковой металлургии имени академика О.В. Романа НАН Беларуси
г. Минск

<https://doi.org/10.5281/zenodo.10655624>

Abstract

Operational defects and their impact on structural changes and destruction of structural steel products provided to the accredited Testing Center of the Academician O.V. Roman Institute of Powder Metallurgy of the National Academy of Sciences of Belarus, leading enterprises of mechanical engineering and petrochemistry of Belarus are investigated. The reasons for the formation of defects under the influence of loads, elevated temperatures, and a corrosive environment are shown. Knowledge of the patterns of degradation of the structure will improve the reliability and durability of products.

Аннотация

Исследованы эксплуатационные дефекты и их влияние на изменение структуры и разрушение изделий из конструкционных сталей, предоставленные в аккредитованный Испытательный центр Института порошковой металлургии имени академика О.В. Романа НАН Беларуси, ведущими предприятиями машиностроения и нефтехимии Беларуси. Показаны причины образования дефектов под действием нагрузок, повышенных температур, коррозионной среды. Знание закономерностей деградации структуры позволит повысить надежность и долговечность изделий.

Keywords: operational defects, structural steels, destruction, structure, properties.

Ключевые слова: эксплуатационные дефекты, конструкционные стали, разрушение, структура, свойства.

При эксплуатации изделия из конструкционных сталей подвергаются механическим нагрузкам, воздействиям повышенных или пониженных температур и агрессивных сред. Указанные факторы способны с той или иной степенью интенсивности изменять структуру и свойства сталей. Температурный фактор непосредственно влияет на фазовый состав, поскольку каждой фазе соответствует температурный интервал, в котором она может существовать. Кроме того, внутри этих интервалов возможно изменение морфологии фаз. Нагрузки, приложенные к изделию, способны преобразовывать тонкую зернограницную структуру металла (в результате пластической деформации) и фазовый состав (образование деформационного мартенсита). Среда влияет на структуру и фазовый состав металла в основном через диффузионные процессы. Они способны изменить содержание и распределение некоторых элементов и, тем самым, привести к образованию или исчезновению фаз. При хранении, транспортировке, монтаже изделие может получить механические повреждения. Возможно растрескивание под действием внутренних напряжений. Нередкое явление — *атмосферная*

коррозия металлов. Она может быть поверхностной, а может распространяться в глубь металла. Очень опасна коррозия, поражающая преимущественно границы зерен — межкристаллитная коррозия. При эксплуатации также возможна поверхностная или более глубокая (в том числе межкристаллитная коррозия) под действием агрессивных сред: жидкостей, газов. Специфическим видом разрушения является коррозия под напряжением, при которой агрессивное действие среды усиливается внутренними напряжениями в металле изделия [1, 2].

Трещины от перегрузов

Разрушение объектов при эксплуатации может произойти под действием чрезмерных внешних нагрузок. Нагрузка может быть кратковременной (в том числе ударной), длительной и многократно прикладываемой. Длительная статическая нагрузка может привести к разрушению объекта даже в тех случаях, когда такая же кратковременная нагрузка для него не опасна [1-4]. Под действием длительной нагрузки происходит медленная деформация объекта, постепенно ослабляющая его прочность. Это явление называют ползучестью. Оно часто проявляется при эксплуатации металлических деталей,

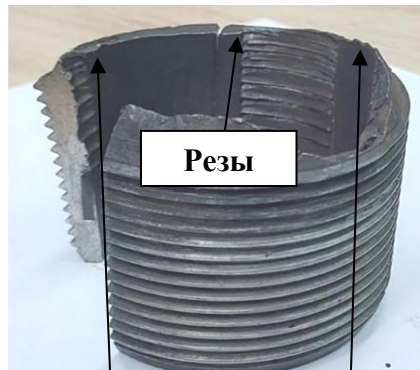
особенно при повышенной температуре. Допустимые многократно прилагаемые (циклические) нагрузки значительно меньше допустимых статических.

Для установления причины разрушения переводника K73BxK73B, было проведено определение соответствия элементного состава, механических свойств, твердости, микроструктуры требованиям

ГОСТ Р 53366-2009 «Трубы стальные, применяемые в качестве обсадных или насосно-компрессорных труб для скважин в нефтяной и газовой промышленности. Общие технические условия». Для выявления характера разрушения изучалась морфология излома. Общий вид переводника K73BxK73B представлен на рис. 1, морфология излома образца – на рис. 2.



а



Следы ловильного инструмента

б

Рис. 1. Общий вид переводника K73BxK73B:

а – вырезанный на исследование отрезок трубы; б – разрушенный nipple

На рис. 1 показано, что в 3-х местах на внутренней поверхности разрушенного nipple присутствуют следы ловильного инструмента в виде борозд глубиной порядка 1,5 мм, на наружной поверхности – резы глубиной до 5 мм.

Исследование морфологии излома выявило, что пережатие nipple ловильным инструментом (рис. 2, б, г, ж) и оплавление излома в результате резки (рис. 2, в) привело к искажению информации

о характере излома. Вероятнее всего, развитие трещины происходило от впадины наружной резьбы к внутренней поверхности nipple'ной части.

В местах, не поврежденных инструментом, излом мелкокристаллический (рис. 2, а, участок 4, д), слабовыраженный усталостный, о чем свидетельствуют сглаженные ступеньки усталости (рис. 2, д, е). Дефектов металла на изломе не выявлено.

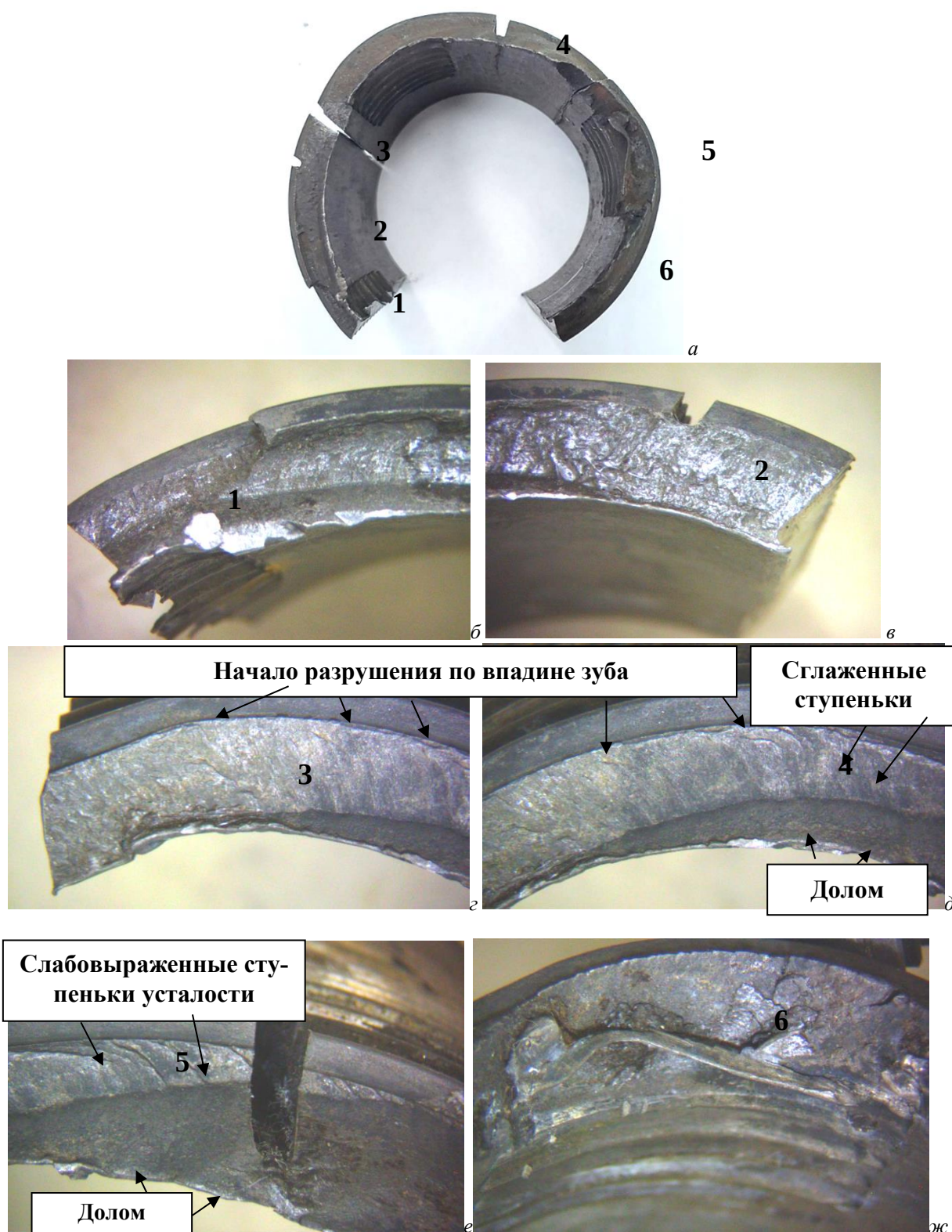


Рис. 2. Морфология излома переводника K73BxK73B: а – излом; б – участок 1; в – участок 2; г – участок 3; д – участок 4; е – участок 5; ж – участок 6

Определено, что по элементному составу с учетом погрешности измерений материал образца соответствует стали марки 32Г2А (ГОСТ 1050-2013 «Металлопродукция из нелегированных конструкционных качественных и специальных сталей»).

Твердость по Бринеллю составляет 295-300 НВ. Результаты испытания на растяжение представлены в табл. 1.

Таблица 1.

Результаты испытания на растяжение переводника K73BxK73B

Наименование	№ измерения	Предел текучести, МПа	Временное сопротивление, МПа	Относительное удлинение, %
Переводник K73BxK73B	1	842	1020	15,5
	2	830	1030	14,3
	3	833	1000	14,8
	Среднее	835	1017	14,9

Микроструктура образца представлена на рис. 3.

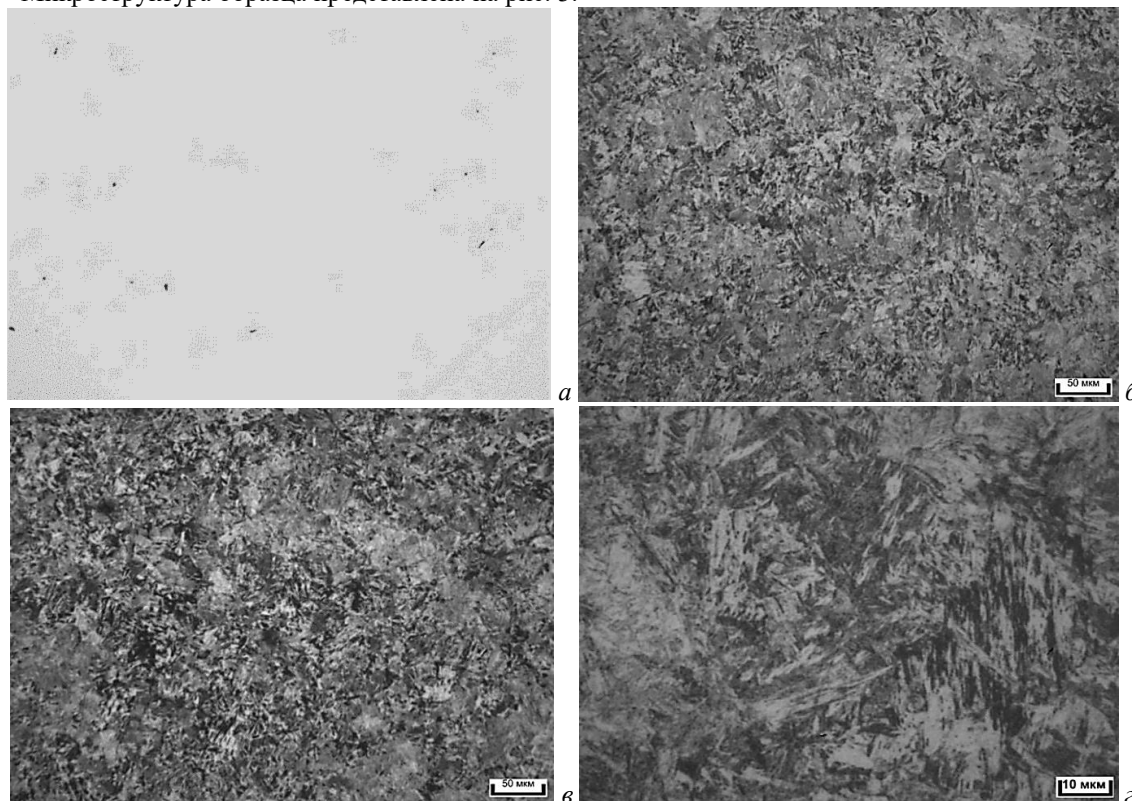


Рис. 3. Микроструктура переводника K73BxK73B, x100, x500: а – загрязненность неметаллическими включениями; б – полосчатость; в – размер зерна; г – тип структуры

Загрязненность неметаллическими включениями образца в среднем составляет: оксиды точечные – 1,0 балла, оксиды строчечные – 0,5 балла, сульфиды – 0,3 балла, силикаты хрупкие – 0,75 балла, силикаты недеформирующиеся – 1,0 балла. Полосчатость – 0 балла.

Диапазон размера аустенитного зерна 5-25 мкм. Средний размер зерна 0,014 мм (9 балл). Микроструктура представляет собой троостосорбит, полученный после закалки с высоким отпуском.

В результате проведенных исследований установлено:

- элементный состав образца соответствует стали марки 32Г2А ГОСТ 1050-2013;

- твердость по Бринеллю 295-300 НВ соответствует требованиям чертежа, предоставленного заказчиком (по чертежу твердость должна быть 285...365 НВ);

- по механическим свойствам материал образца соответствует группе прочности М, заявленной в сертификате качества, представленном заказчиком (по сертификату временное сопротивление должно быть не менее 862 МПа, предел текучести

758-965 МПа, относительное удлинение – не менее 10,8 %) и ГОСТ 10006-80;

- структура согласуется с механическими свойствами и твердостью, полученными после термообработки закалки с высоким отпуском;

- загрязненность неметаллическими включениями незначительная;

- морфология излома показывает, что излом слабовыраженный усталостный, разрушение произошло по впадине зуба резьбы;

- материал переводника K73BxK73B соответствует сертификату качества и ГОСТ Р 53366-2009.

На основании проведенных исследований был сделан вывод, что появление и последующее развитие первичных трещин вызвано многоцикловыми нагрузками (вибрациями) в процессе эксплуатации.

Трещины усталости

Трещины усталости являются наиболее распространенными эксплуатационными дефектами [3 - 5]. Основная причина усталостных разрушений деталей – действие высоких переменных напряжений.

Возникают в местах концентрации напряжений: по галтелям, в местах с резкими переходами сечений и наличием подрезов, у основания резьбы и зубьев шестерен, в углах шпоночных канавок, у отверстий для смазки или в местах других конструктивных или технологических концентраторов напряжений.

Появляются в местах дефектов металлургического и технологического происхождения или следов грубой механической обработки поверхности (глубоких рисок, следов резца и т.п.). Трещины усталости различают по внешнему виду.

Чаще всего бывают двух типов: а) поперечные или кольцевые трещины, развивающиеся на цилиндрических деталях по окружности в сечении, перпендикулярном к оси детали; б) трещины, расположенные под углом к оси детали.

В зоне усталостного разрушения отсутствуют какие-либо признаки пластической деформации даже у самых пластичных материалов. Ширина раскрытия усталостной трещины у выхода ее на поверхность в начальной стадии разрушения не превышает нескольких микрон.

Для определения причины разрушения двух образцов лопаток разрушенной (с маркировкой № 1) и с трещинами (с маркировкой № 2) турбоагрегата ПТ-70-130/40/13-ТЭС был проведен анализ элементного состава, исследование морфологии излома, структуры, измерение твердости.

По элементному составу с учетом погрешности измерений материал образцов соответствует стали марки 20Х13 (ГОСТ 5632-72 «Стали высоколегированные и сплавы коррозионностойкие, жаростойкие и жаропрочные»).

На рис. 4 представлен общий вид лопаток разрушенной и с трещинами турбоагрегата ПТ-70-130/40/13-ТЭС.

Показано, что разрушение лопатки с маркировкой № 1 произошло по хвостовику. Радиальные уплотнительные гребни на этом образце погнуты и смяты. На образце лопатки с маркировкой № 2 наблюдается трещина в районе хвостовика, расположенная от радиусного перехода "Т-образной зоны" к краю хвостовика.

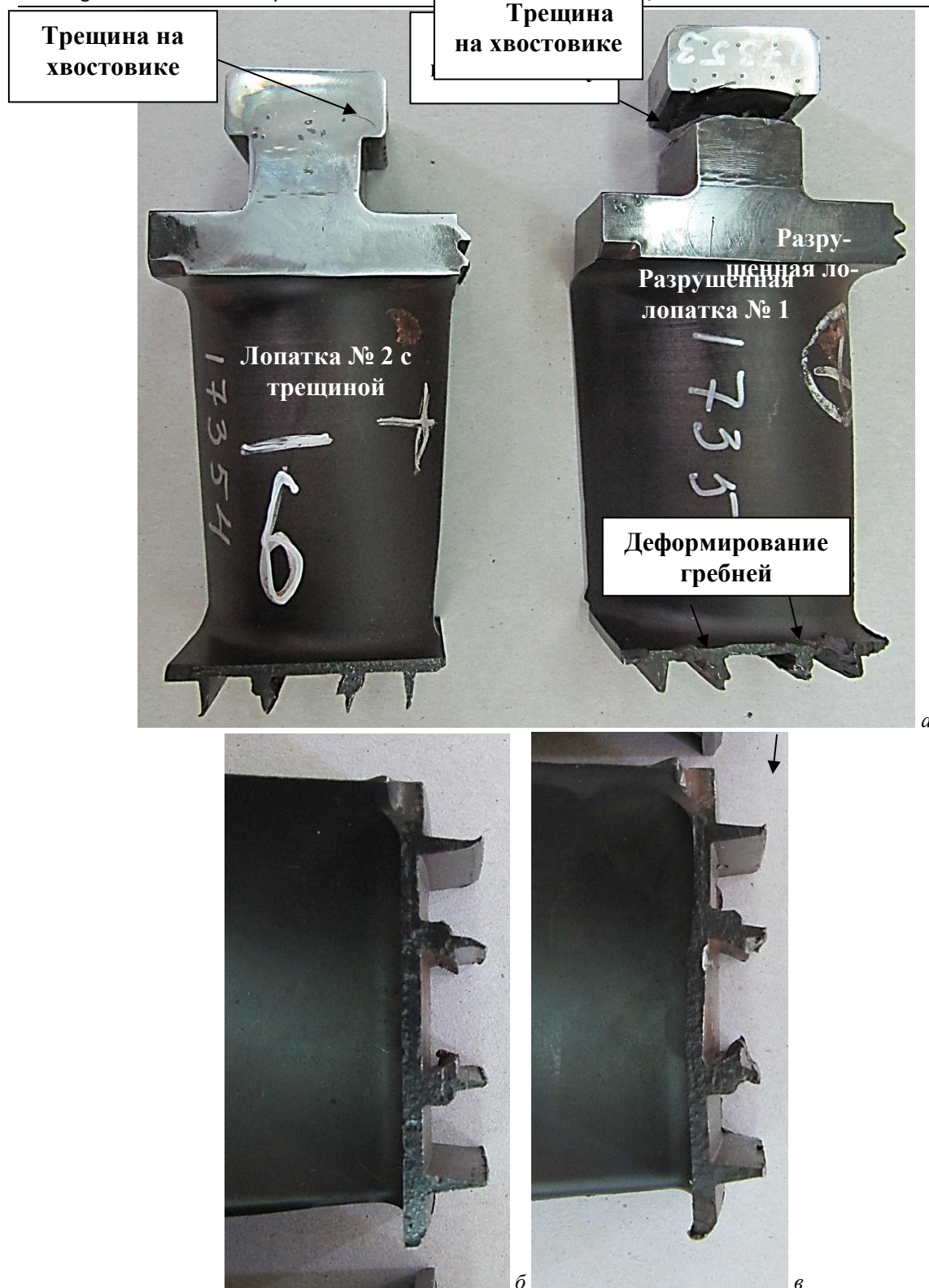


Рис. 4. Общий вид лопаток: а – лопатка с трещиной и разрушенная лопатка; б, в – смятые и погнутые радиальные уплотнительные гребни

Определено, что на разрушенной лопатке хвостовик полностью оторван (рис.5). Поверхность излома затерта, имеются отложения. Наблюдается расслоение материала лопатки рядом с поверхностью разрушения. Просматриваются следы усталости на поверхности излома. Четко выявить очаг разрушения не представляется возможным из-за большой затертости излома.

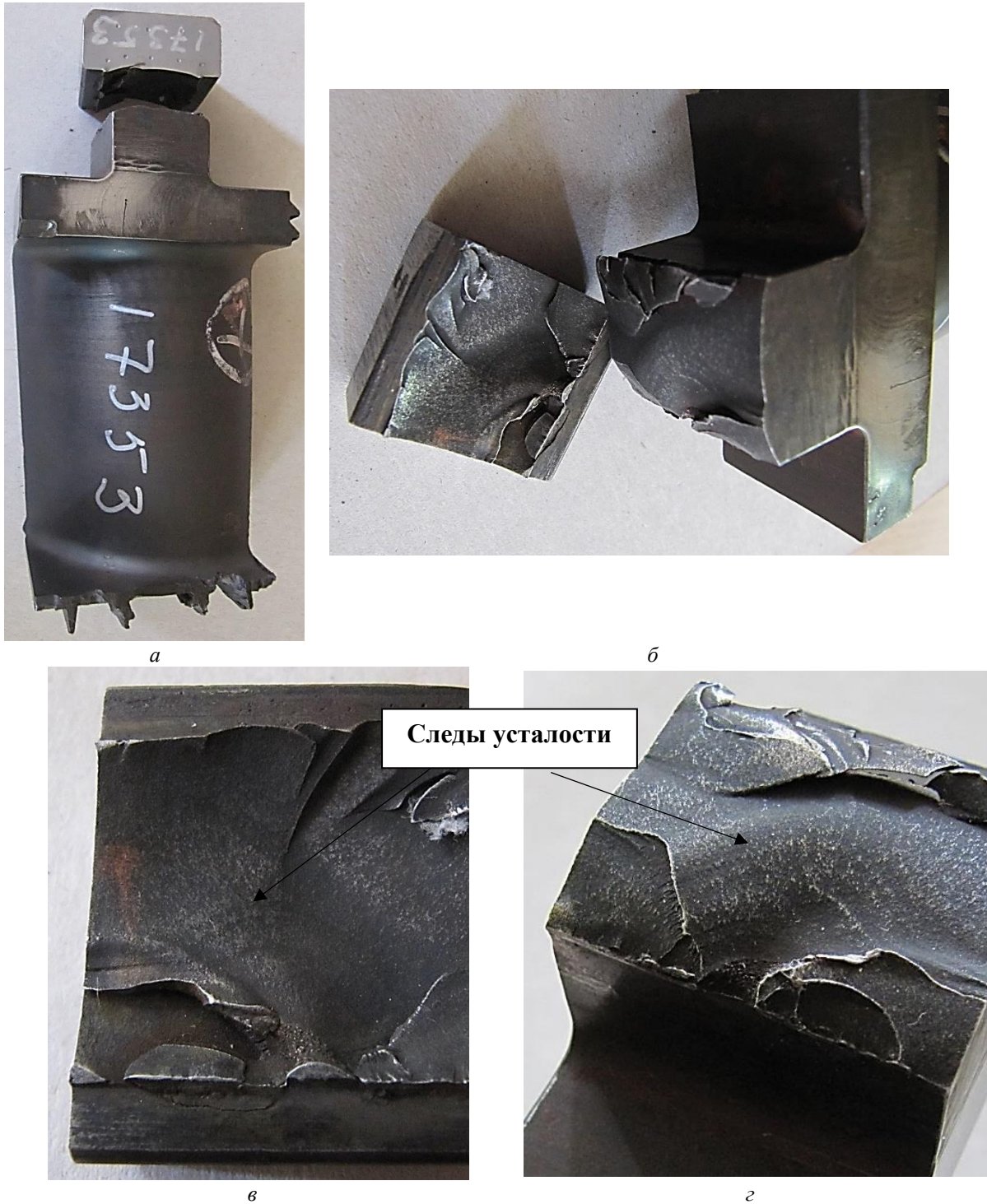


Рис. 5. Разрушенная лопатка с маркировкой № 1: а – общий вид; б – излом и ответная часть излома хвостовика; в - з – следы усталости на поверхности излома

Морфология поверхности излома с трещинами и расслоениями представлена на рис. 6.

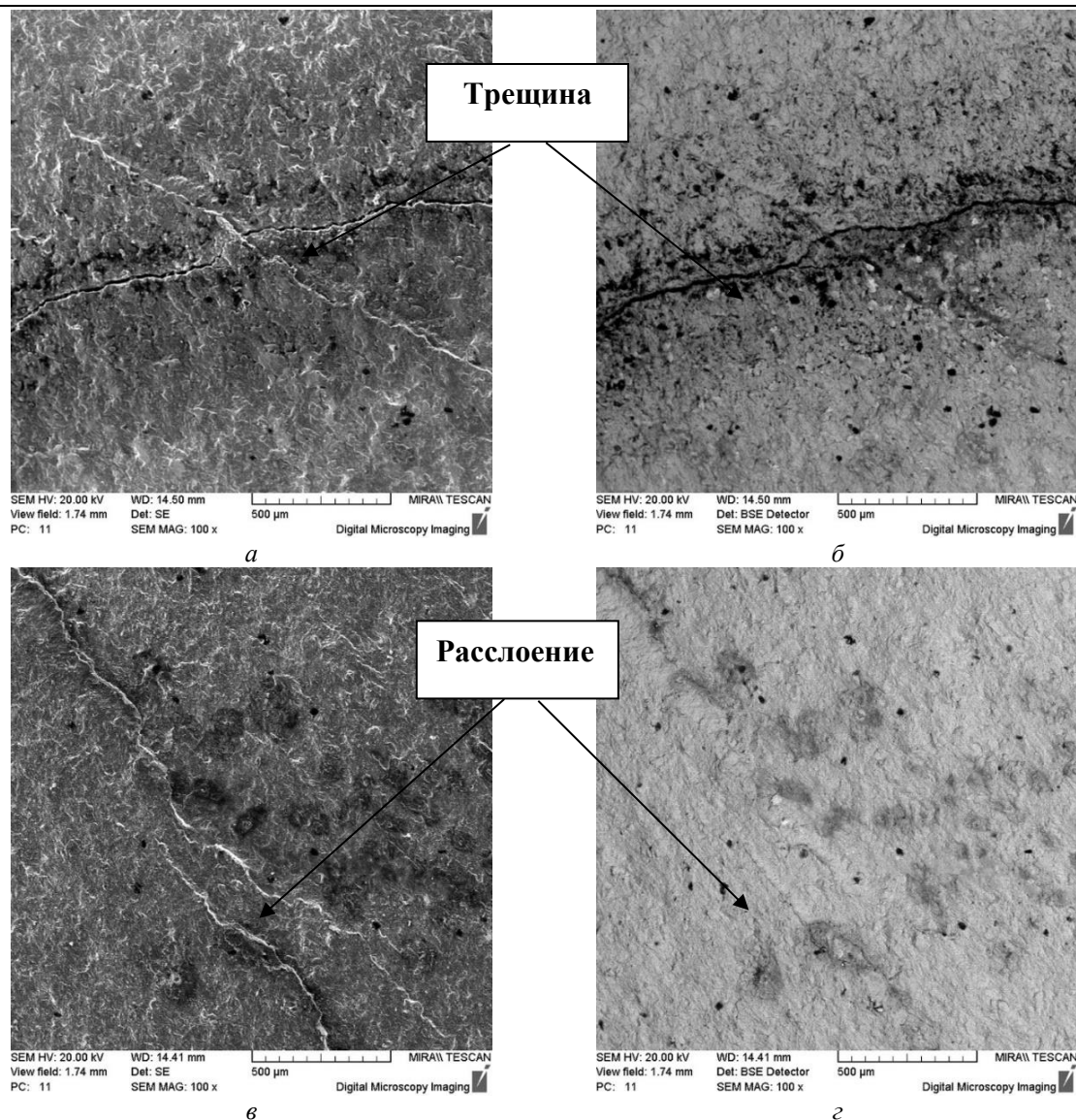


Рис. 6. Морфология излома с трещиной и расслоениями, снятая в режиме вторичных электронов (SE) и обратно отраженных электронов (BSE), $\times 100$: а, в – режим SE; б, г – режим BSE

Микроструктура образцов лопаток разрушенной и с трещинами представляет собой сорбит, полученный в результате закалки с высоким отпуском (рис. 7).

На разрушенной лопатке и лопатке с трещиной присутствуют разупрочненные зоны с твердостью

190-200 HB, по которым развиваются трещины и расслоения, что свидетельствует об усталостных процессах, происходящих при эксплуатации. Основная твердость обоих лопаток составляет 260 – 270 HB.

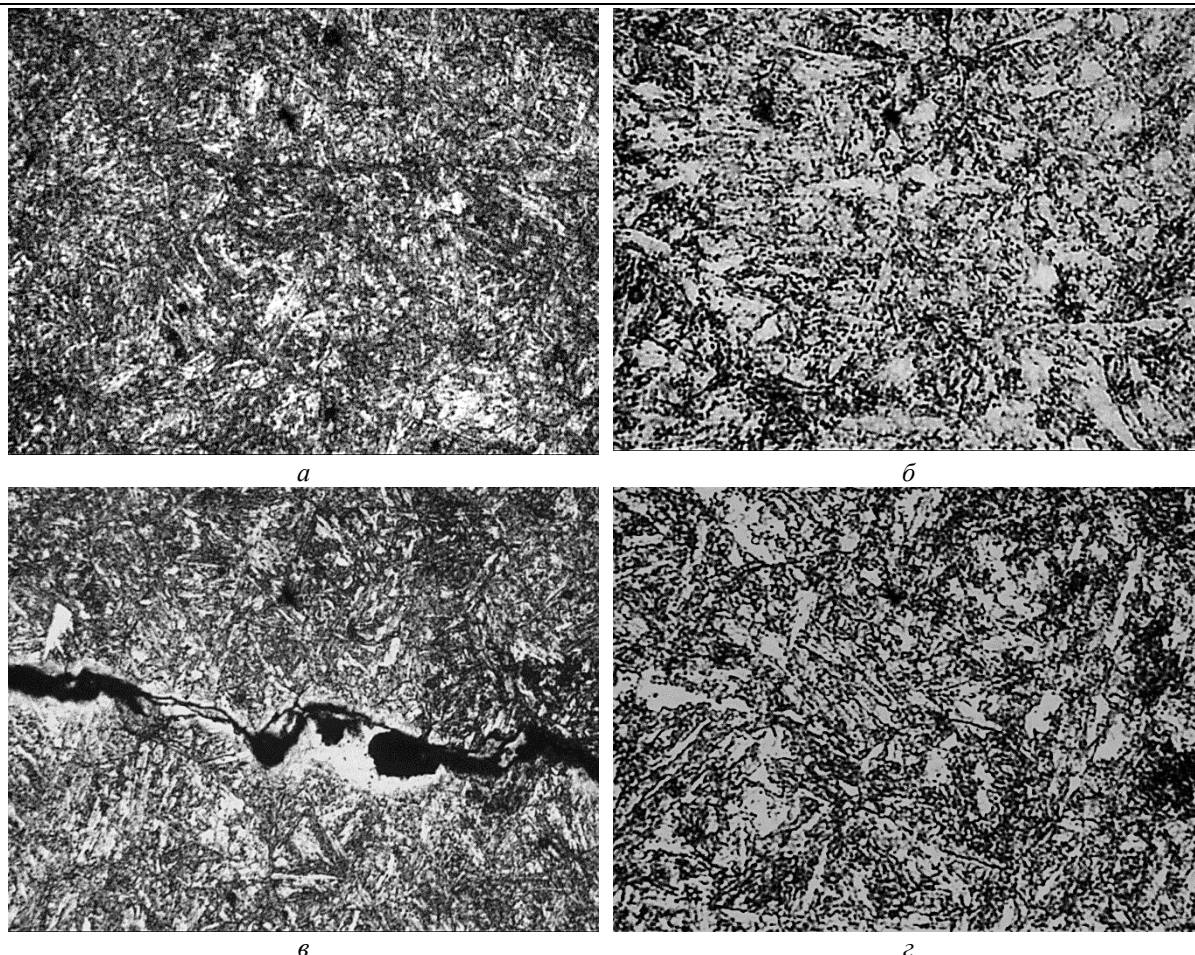


Рис. 7. Микроструктура образца разрушенной лопатки № 1 (а, б) и лопатки с трещиной № 2 (в, г), $\times 500$: а – расслоение на участке разупрочнения; б, г – разупрочненные зоны на участке следов усталости; в – на участке с трещиной

В результате исследований установлено:

- химический состав образцов лопаток разрушенной и с трещинами соответствует стали марки 20X13 ГОСТ 5632-72 «Стали высоколегированные и сплавы коррозионностойкие, жаростойкие и жаропрочные»;

- твердость составляет 250-260 НВ и соответствует требованиям ОСТ 108.020.03-82 "Заготовки лопаток турбинных и компрессоров штампованные, свободно кованные и катаные из коррозионностойкой стали. Общие технические требования", предоставленным заказчиком. По ОСТ твердость должна составлять 229-269 НВ;

- микроструктура – сорбит, соответствует термообработанному состоянию стали 20X13 после закалки и высокого отпуска;

- в образцах лопаток разрушенной и с трещиной обнаружены зоны разупрочнения с пониженной твердостью 190-210 НВ, по которым развиваются трещины и расслоения, что свидетельствует об усталостном характере разрушения лопаток в процессе эксплуатации.

Проведенные исследования показали, что разрушение и образование трещин вызвано образова-

нием разупрочненных зон при эксплуатации, связанными с развитием усталостных явлений в материале.

Разрушение под действием температурных воздействий. Старение, науглероживание, выгорание, коррозия

Разрушение под действием термических напряжений происходит вследствие теплового градиента [1-5]. Причиной возникновения трещин при этом является образование локальных полей напряжений.

С целью определения причины выхода из строя элементов трубопровода выхода этан-этиленовой фракции из реактора гидрирования на фильтр и линии сдувки из реактора были проведены исследования химического состава, микроструктуры. Общий вид фрагментов с маркировкой представлен на рис. 8. Исследовались основной металл и сварной шов на неповрежденном (фрагменты I, II) и разрушенном (фрагмент III) участках элемента трубопровода выхода этан-этиленовой фракции из реактора на фильтр, а также основной металл и сварной шов на неповрежденном и разрушенном (фрагмент VI) участках элемента линии сдувки из реактора турбокомпрессора.



Рис.8. Общий вид элементов трубопровода: а – элемент трубопровода выхода этан-этиленовой фракции из реактора на фильтр; б – элемент линии сдувки из реактора турбокомпрессора

Микроструктура основного металла элемента трубопровода выхода этан-этиленовой фракции из реактора гидрирования на фильтр на неповрежденном участке (фрагмент I) феррито-перлитная. Присутствует видманштетт не более 1,5 балла. Полосчатость не более 1 балла. Размер зерна составляет

20-40 мкм (среднее 30 мкм), 7 балл (рис. 9, а - в). Труба находится в горячекатаном состоянии. Материал фрагмента соответствует стали марки 20 (ГОСТ 1050-2013 «Металлопродукция легированных конструкционных качественных и специальных сталей»).

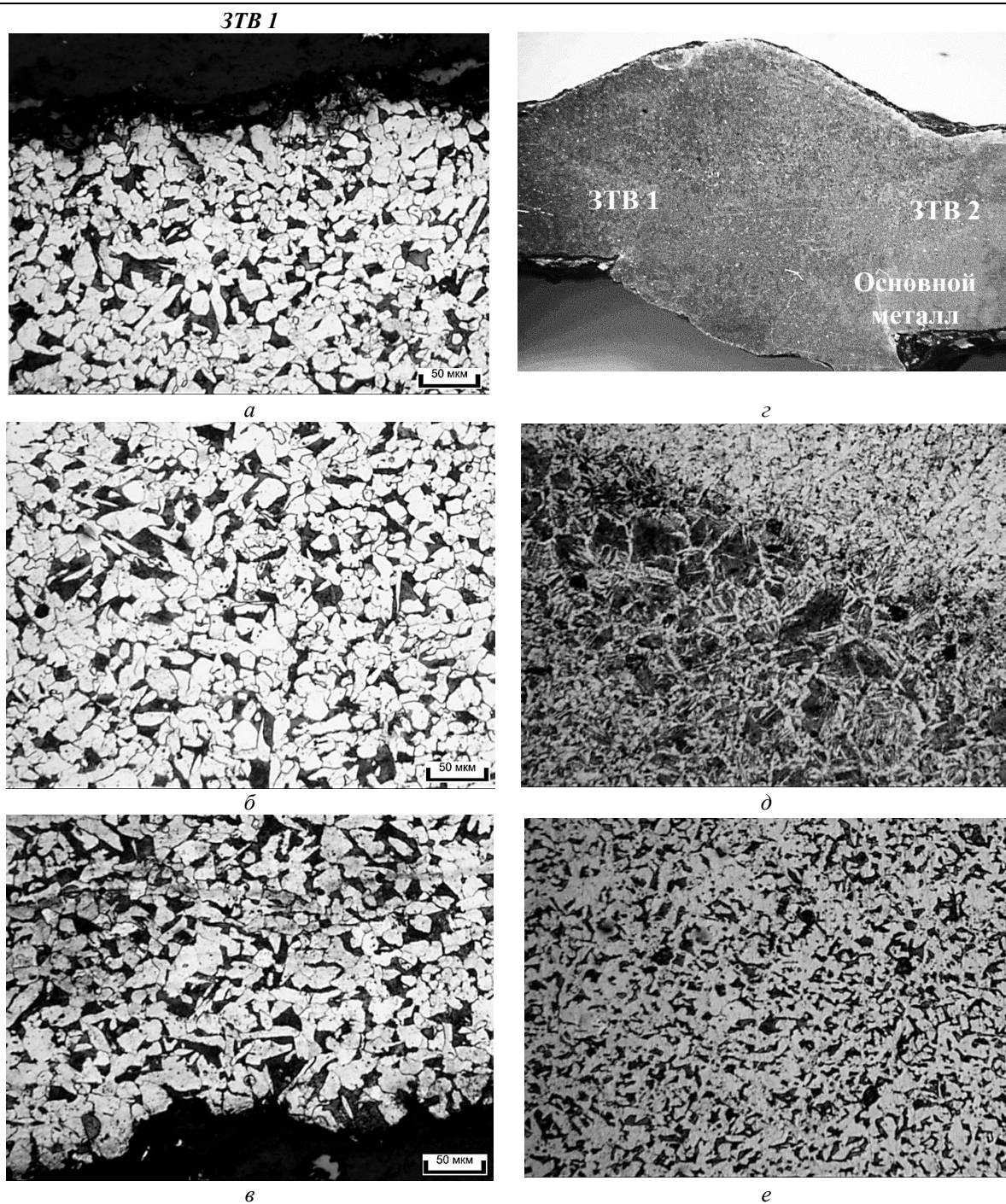


Рис. 9. Микроструктура образца основного металла (а-в, $\times 100$), макро - и микроструктура ($\times 100$) сварного шва (г-е) элемента трубопровода выхода этан-этиленовой фракции из реактора гидрирования на фильтр на неповрежденном участке : а – у края наружной поверхности; б – сердцевина; в – у края внутренней поверхности; г – макроструктура сварного шва; д, е – ЗТВ 1, ЗТВ 2

На неповрежденном участке сварного соединения непровары, поры, подрезы не наблюдаются (фрагмент II). Присутствует небольшой локальный перегрев со стороны валика сварного шва в ЗТВ 1 на трубе толщиной 6,5 мм с увеличением размера зерна основного металла до 250 мкм относительно среднего исходного 30 мкм. С другой стороны сварного шва в ЗТВ 2 перегрев отсутствует (рис. 9, г - е).

На разрушенном участке элемента трубопровода (фрагмент III) выхода этан-этиленовой фракции из реактора гидрирования на фильтр наблюдается старение основного металла, проявляющееся в сфероидизации перлита, характерное для эксплуатации труб при высоких температурах (рис.10).

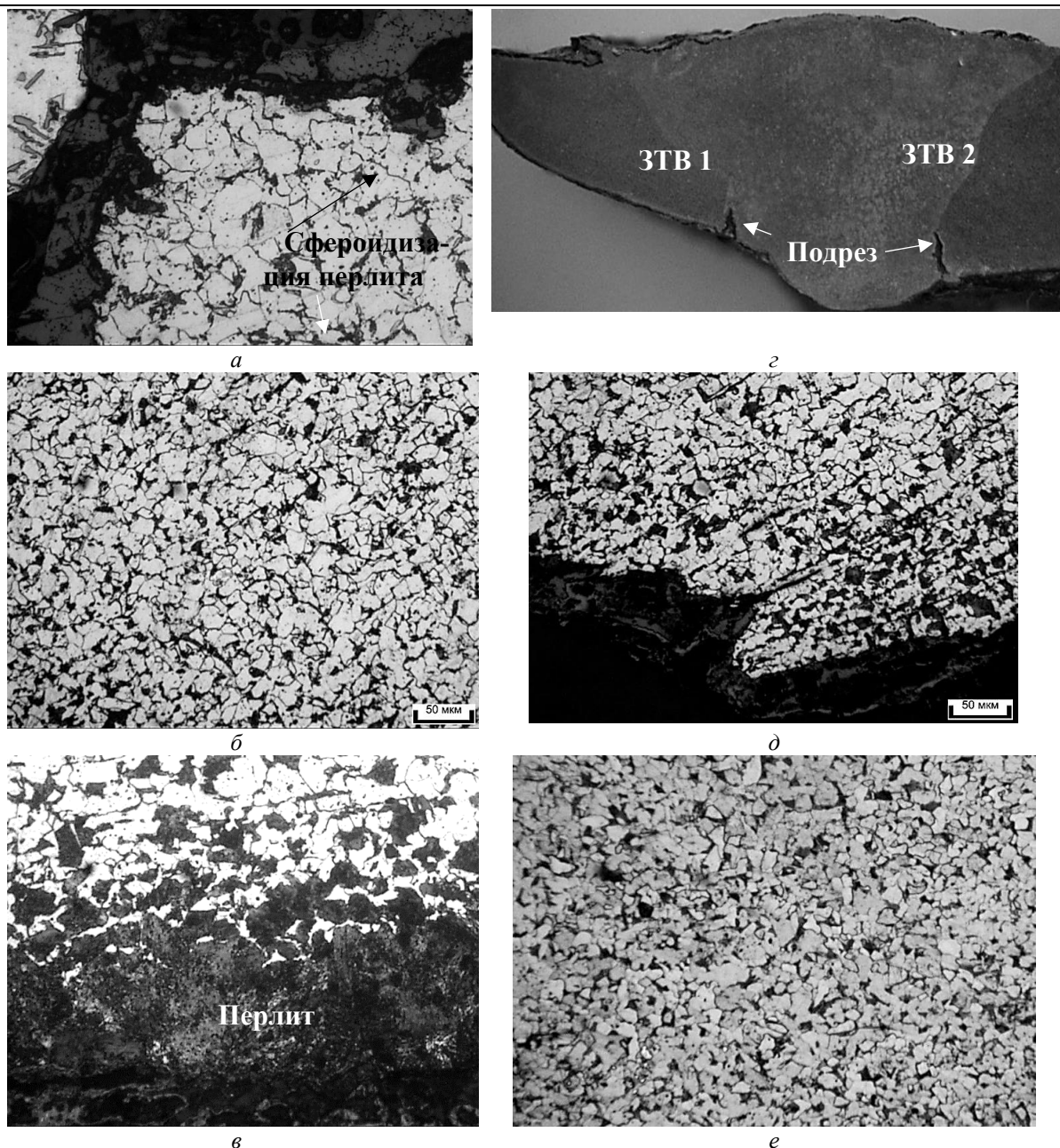


Рис. 10. Микроструктура образца основного металла (а-в, $\times 100$), макро - и микроструктура ($\times 100$) сварного шва (г-е) элемента трубопровода выхода этан-этиленовой фракции из реактора гидрирования на фильтр на разрушенном участке : а – у края наружной поверхности; б – сердцевина; в – у края внутренней поверхности; г – макроструктура сварного шва; д – ЗТВ в зоне подреза, е – основной металл

На наружной поверхности трубы присутствуют коррозионные язвы, на внутренней – науглероживание поверхности с образованием практически перлитной микроструктуры (рис. 10, а - в). Материал фрагмента соответствует стали марки 10Г2 (ГОСТ 1050-2013 «Металлопродукция из легированных конструкционных качественных и

специальных сталей»). Сварной шов имеет подрезы со стороны корня шва глубиной 0,7 и 1 мм. Увеличение глубины подрезов произошло в процессе разрушения, о чем свидетельствует их раскрытие по границе шов-ЗТВ (рис. 10, г - е).

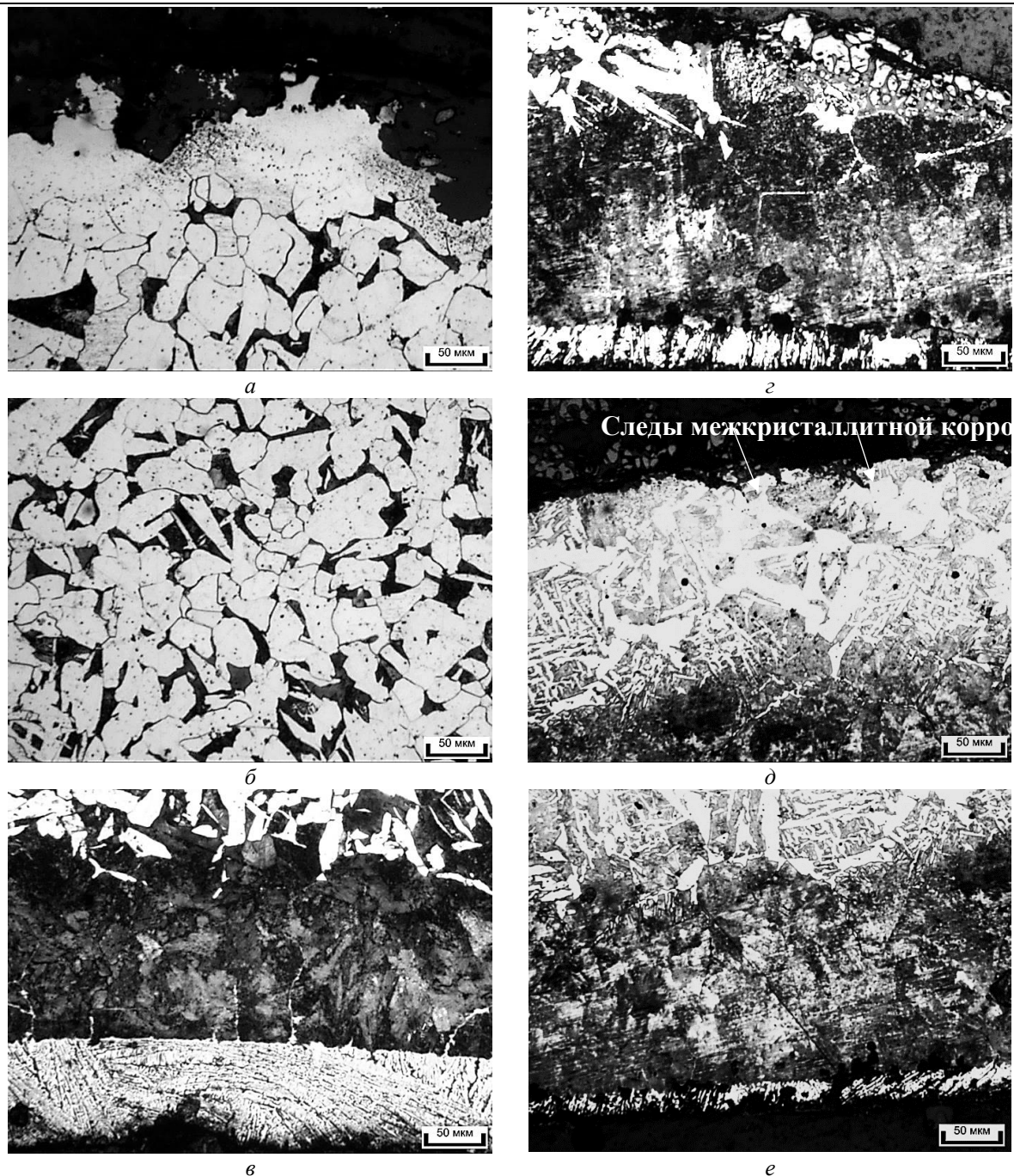


Рис.11. Микроструктура целого (а-в) и разрушенного (з-е) образцов элемента линии сдвиги из реактора, $\times 100$: а, д – у края наружной поверхности; б – сердцевина; в, е – у края внутренней поверхности; з – остаток толщины стенки

Микроструктура неповрежденного образца элемента линии сдвиги из реактора феррито-перлитная. Труба находится в горячекатаном состоянии. Наблюдается видманштетт 1 балла. Размер зерна составляет 20-100 мкм (рис. 11, а-в). На наружной поверхности присутствуют язвы выгорания. Край наружной поверхности безуглерожен – присутствует ферритная оторочка на глубину до 60 мкм. На внутренней поверхности наблюдается слой эвтектической фазы толщиной 100 мкм. Затем слой перлита толщиной до 150 мкм. Данные структуры образовались в результате насыщения внутренней поверхности углеродом при воздействии повышенной температуры. Материал образца соответствует

стали марки 20 (ГОСТ 1050-2013 «Металлопродукция из нелегированных конструкционных качественных и специальных сталей»).

Микроструктура разрушенного образца элемента линии сдвиги из реактора представляет деградированную структуру неповрежденного участка образца, описанную выше. Наблюдаются места с практически вырожденной феррито-перлитной структурой (рис. 11, з) или с большей степенью видманштетта 4-5 балла, связанные с перегревом и выгоранием (рис. 11, д, е). Наружный край характеризуется язвами выгорания, внутренний – образованными слоями эвтектики глубиной до 50 мкм и перлита глубиной до 200 мкм. В структуре металла наблюдаются следы межкристаллитной

коррозии, которая способствовала разрушению материала линии сдвиги. На исследованных фрагментах с наружной и внутренней сторон трубы наблюдаются коррозионные повреждения. С внутренней стороны коррозионное повреждение сильнее, что подтверждается язвами выгорания и образованием эвтектической составляющей типа перлита, за счет насыщения углеродом поверхности изнутри. С наружной стороны наблюдаются язвы от выгорания и следы межкристаллитной коррозии, выявленные с наружной стороны фрагмента III в зоне разрушения.

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что разрушение (разгерметизация) трубопровода вызвана повышением температуры стали изнутри выше температуры текучести, т.к. для образования эвтектической составляющей, температура внутри трубы по диаграмме железо-углерод должна быть не менее 727°C, добавление других легких элементов могло понизить температуру до 600°C.

В статье автором рассмотрены причины потери несущей способности изделий из конструкционных сталей под действием нагрузок, повышенных температур, агрессивных сред. Показаны закономерности влияния эксплуатационных дефектов на образование трещин и разрушение. Анализ и систематизация результатов исследования позволят

устранить эксплуатационные дефекты, повысить надежность и долговечность металлоизделий.

Список литературы:

1. Повышение прочностных свойств элементов металлоконструкций методами высокоэнергетического упрочнения и термической обработки / В.Н. Ковалевский, П.А. Витязь, А.Ф. Ильющенко, Ю.Г. Алексеев, И.В. Фомихина. – Минск: БНТУ, 2013. – 364 с.
2. Фомихина, И. В. Механизмы деградации структуры конструкционных сталей, методы повышения эксплуатационных свойств изделий из них : дис. ... д-ра техн. наук : 05.16.09 / И. В. Фомихина. – Минск, 2018. – 398 л.
3. Атлас производственных разрушений различных конструкций / А. Ф. Ильющенко, Л. В. Маркова, В. А. Чекан, И. В. Фомихина, В. В. Коледа. – Беларуская навука, 2017. – 312 с.
4. Атлас производственных разрушений различных конструкций из цветных металлов и сплавов / А. Ф. Ильющенко, Л. В. Маркова, В. А. Чекан, И. В. Фомихина, В. В. Коледа. – Беларуская навука, 2022. – 364 с.
5. Fomikhina I. Defects in casting, metal forming, heat treatment and ways to eliminate them at the production stage // Annali d'Italia journal No 49/2023, p. 111-127. DOI: 10.5281/zenodo.10214709.